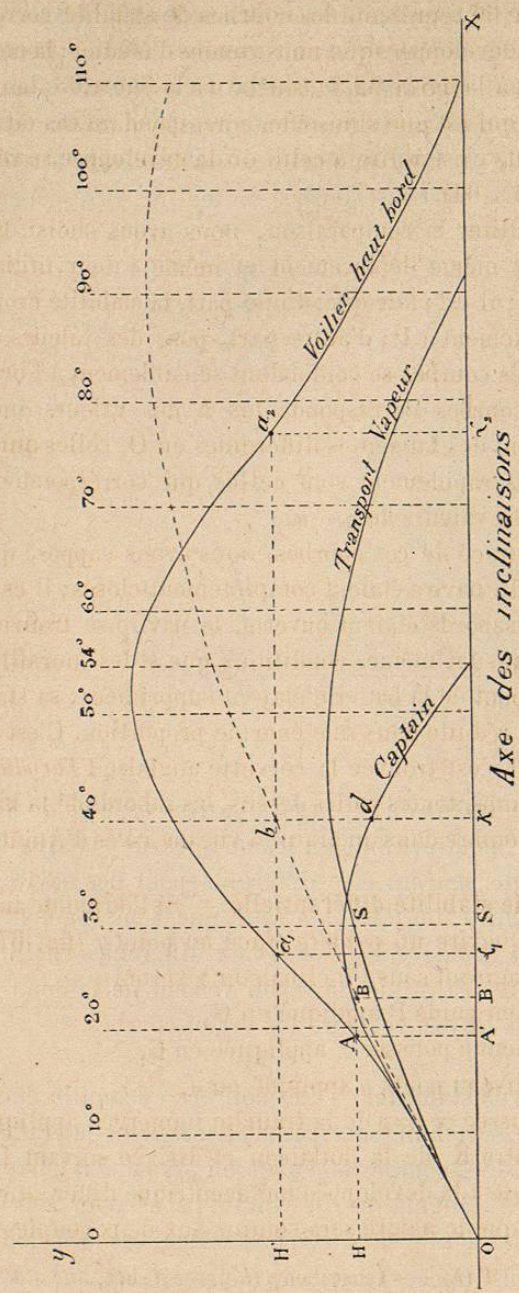

Fig. 66.

La figure 66 représente les courbes de stabilité correspondantes aux développées que nous venons d'étudier ; la courbe a correspond à la figure 62, la courbe d à la figure 63 ; la courbe pointillée, qui est une sinusoïde, correspond au cas où $h - a$ est constant, c'est-à-dire à celui où la développée se réduit à un point (fig. 64).

Pour faciliter la comparaison, nous avons choisi des navires ayant même déplacement et même valeur initiale de la stabilité ; il est clair que, d'une part, la stabilité croît proportionnellement à P ; d'autre part, pour des valeurs égales de $\rho - a$, les courbes se confondent sensiblement à l'origine, mais les courbes correspondantes à des valeurs inégales de $\rho - a$, ont des tangentes différentes en O, celles qui montent le plus rapidement sont celles qui correspondent aux plus grandes valeurs de $\rho - a$.

Pour le tracé de ces courbes, nous avons supposé que les murailles du navire étaient complètement closes ; il est clair que, si les sabords étaient ouverts, le navire se trouverait à peu près dans les mêmes conditions que si les murailles au-dessus du pont de la batterie étaient supprimées ; sa stabilité serait donc réduite dans une énorme proportion. C'est le cas dans lequel s'est trouvée la corvette anglaise l'*Eurydice* qui, par beau temps, toutes voiles dessus, les sabords de la batterie ouverts, a sombré dans un grain en vue des côtes d'Angleterre.

Courbe de stabilité différentielle. — Si l'on ajoute au chargement du navire un poids p placé au point g (fig. 67), les forces qui agiront sous l'inclinaison θ_1 seront :

l'ancien poids P appliqué en G,
l'ancienne poussée π appliquée en C,
le nouveau poids p appliqué en g,
la poussée $\varpi = p$ de la tranche immergée appliquée au centre K_1 de la flottaison et dirigée suivant la tangente à la développée métacentrique différentielle.

De sorte que le navire sera soumis aux deux couples :

$$P(h_1 - a)\sin\theta_1, \text{ et } p(h'_1 - a')\sin\theta_1.$$

Conformément aux conventions antérieures (Stabilité différentielle), dans cette dernière expression a' représente gK_0, et h'_1 la hauteur métacentrique différentielle $K_0h'_1$.

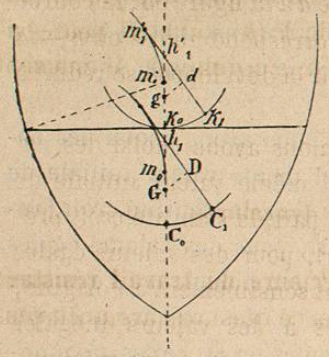

Fig. 67.

L'analogie entre le couple de stabilité et le couple différentiel, déjà signalée pour les petites inclinaisons, persiste donc pour les grandes inclinaisons, et l'on peut appliquer à l'étude de la stabilité différentielle tout ce que l'on vient de voir relativement à la stabilité proprement dite.

Ainsi, on pourra tracer la courbe de stabilité différentielle b de la figure 68 comme on a tracé la courbe a de stabilité; et, pour obtenir la courbe a' correspondante au nouvel état de chargement, il suffira d'ajouter aux ordonnées de la courbe a les ordonnées de la courbe b correspondantes à une même

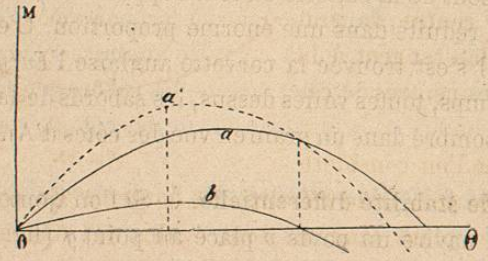

Fig. 68.

inclinaison. Nous supposons ici, toutefois, que l'on ait pris pour ordonnées, non les valeurs des bras de levier $(h - a) \sin \theta$ et $(h' - a') \sin \theta$, mais bien les valeurs de $P(h - a) \sin \theta$ et $p(h' - a') \sin \theta'$. Le plus souvent, pour tracer les courbes de stabilité, on prend pour ordonnées les bras de levier seuls; cela suffit en effet pour comparer les grandeurs du moment de stabilité aux différentes inclinaisons, puisque P est constant; mais, si l'on voulait comparer les valeurs de la stabilité correspondante, à deux états de chargement, il faudrait employer les moments eux-mêmes, car ce qu'il importe de connaître, ce sont les variations de $P(h - a)$ et il peut évidemment arriver que, bien que $h - a$ diminue, le moment $P(h - a)$ augmente.

§ 3. — Stabilité dynamique.

Évaluation d'une limite inférieure du travail résistant pendant l'inclinaison. — D'après ce que nous avons dit plus haut, page 31, le travail nécessaire pour amener le navire de la position d'équilibre à une position inclinée d'un angle θ, est supérieur au produit du poids du navire par l'accroissement de la distance du centre de gravité au plan tangent à la surface des centres de carène.

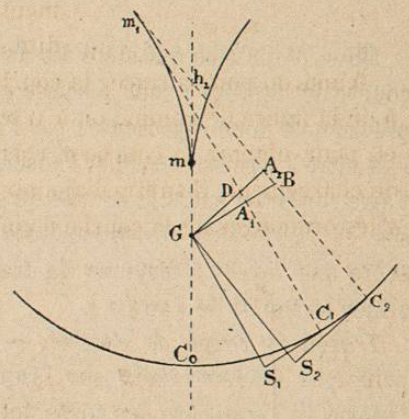

Fig. 69.

Lorsque l'on considère des inclinaisons transversales, les hauteurs du point G au-dessus des plans tangents sont égales aux distances de ce point aux tangentes à la courbe C transversale; on peut donc écrire, pour l'inclinaison correspondante au point C_1:

$$\text{Travail résistant} > P(GS_1 - GC_0).$$

Évaluons d'abord l'accroissement $GS_2 - GS_1$ correspondant à un accroissement $d\theta$ de l'inclinaison; pour cela, prolongeons GA_1 jusqu'en B; les lignes DA_2 et A_1B peuvent être considérées comme des arcs décrits du point m_1 comme

centre avec m_1A_1 et m_1A_2 comme rayons, c'est-à-dire comme des arcs concentriques à C_1C_2 ; on a donc :

$$GS_2 - GS_1 = A_2C_2 - A_1C_1 = DA_1 = GA_1 d\theta.$$

Or, on a aussi

$$GS_1 - GC_0 = \Sigma (GS_2 - GS_1),$$

$$GS_1 - GC_0 = \int_0^\theta d.GS_1 = \int_0^\theta GA_1.d\theta,$$

et, par conséquent,

$$\text{Travail résistant} > P \int_0^\theta GA_1.d\theta \quad \text{ou} \quad \int_0^\theta P.GA_1.d\theta.$$

Mais, d'après ce qui a été dit au paragraphe précédent, la courbe de stabilité a pour abscisse $y = P.GA_1$, l'intégrale qui précède est donc représentée par l'aire de la courbe de stabilité entre l'abscisse $x = 0$, et l'abscisse $x = \theta$; on voit ainsi que l'aire comprise entre la courbe de stabilité, l'axe des abscisses et l'ordonnée correspondante à l'inclinaison θ, représente une limite inférieure du travail à dépenser pour incliner le navire de l'angle θ.

Travail du couple de stabilité. — Sans faire intervenir les principes fondamentaux sur lesquels nous avons établi la théorie de l'équilibre des corps flottants, on peut arriver à la même expression en remarquant que, si l'on suppose que le navire reste isocarène pendant l'inclinaison, les forces résistantes se réduisent au couple de stabilité dont le moment est P.GA.

Or, lorsqu'on fait tourner d'un angle infiniment petit un solide qui offre au mouvement un couple résistant P.GA perpendiculaire à l'axe, le travail résistant du couple est égal au produit du moment par l'angle dont le solide a tourné, c'est-à-dire à

$$P.GA.d\theta.$$

Le travail total du couple résistant lorsque l'on fait passer

le navire de la position droite à la position inclinée de l'angle θ est donc égal à

$$\int_0^\theta P.GA.d\theta.$$

C'est l'expression que nous a donnée la méthode rigoureuse qui précède.

Effet d'un couple de moment constant appliqué au navire. — Soit a (fig. 70) la courbe de stabilité d'un navire. Suppo-

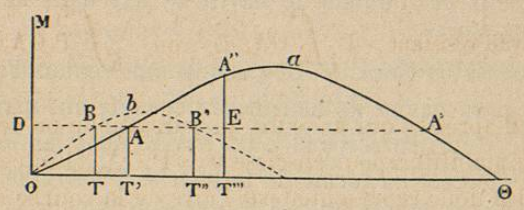

Fig. 70.

sons qu'on applique à ce navire un couple moteur dont le moment soit constant et égal à OD ; on voit, sur la figure, que l'inclinaison pour laquelle le navire offrira un couple résistant égal au couple moteur sera représentée par OT′ ; mais, jusqu'à ce que cette inclinaison soit atteinte, le couple moteur étant supérieur au couple résistant, la vitesse angulaire s'accélérera ; le navire dépassera donc l'inclinaison d'équilibre. A partir de cet instant, au contraire, le couple résistant étant plus grand que le couple moteur, la vitesse angulaire diminuera, et le navire s'arrêtera lorsque la force vive emmagasinée dans la première période aura été absorbée par les travaux résistants.

La demi-force vive emmagasinée dans la première période est égale à l'excès du travail moteur sur le travail résistant ; le travail moteur, $\int OD.d\theta$, est représenté par l'aire du rectangle ODAT′, le travail résistant par OAT′, la demi-force vive est donc représentée par l'aire OAD. De même, dans la seconde période, la demi-force vive absorbée est représentée

par l'aire AEA″; l'inclinaison limite correspondra donc à l'ordonnée OT″ telle que :

$$OAD = AEA''.$$

Dans cette position, le couple de redressement étant supérieur au couple d'inclinaison, le navire se redressera; s'il n'y avait pas absorption de force vive par les travaux passifs, le navire reviendrait droit et continuerait indéfiniment à osciller entre la position droite et l'inclinaison OT″; mais, dans la réalité, la force vive est rapidement absorbée, et après une ou deux oscillations, le navire se fixe dans la position d'équilibre OT′ [1].

Navires ras sur l'eau. — Le cas que nous venons d'analyser est celui d'un navire de haut bord ; considérons maintenant la courbe *b* qui correspond à un navire dont les murailles sont peu élevées. La forme de la courbe à l'origine montre que la stabilité initiale est beaucoup plus forte, l'inclinaison d'équilibre correspondante au même couple OD sera OT au lieu de OT′ ; cependant, sous l'influence de ce même couple, le navire actuellement envisagé risquera de chavirer, tandis que le précédent était en parfaite sécurité.

Supposons, en effet, qu'en raison de l'abaissement rapide de la courbe, l'aire B*b*B′ soit plus petite que l'aire OBD ; jusqu'en B′T″ le travail moteur restera supérieur au travail résistant, par conséquent le navire arrivera à l'inclinaison T″ conservant de la vitesse angulaire ; il dépassera donc cette inclinaison; et comme, à partir de cet instant, le couple moteur restera supérieur au couple résistant, le navire chavirera.

Applications et exemples. — Nous avons supposé toutefois, dans cette analyse, que le travail résistant était égal à celui du

1. Cet effet se remarque lorsque l'on hisse la voile d'une embarcation; l'embarcation s'incline d'abord d'un grand angle, puis elle se redresse et reprend la bande correspondante à l'intensité du vent ; on le constate également au passage des risées, la coïncidence du redressement et de l'augmentation de vitesse faisait dire autrefois que l'embarcation était plus stable quand elle augmentait de vitesse ; cette explication est évidemment inexacte.

couple de stabilité et nous avons vu, page 143, qu'il lui était supérieur; les limites de sécurité auxquelles conduirait l'application de cette méthode seraient donc *à fortiori* dignes de toute confiance; malheureusement, on ne peut pas évaluer en nombres l'intensité des couples qui tendent à incliner les navires et on ne peut utiliser les courbes de stabilité qu'à titre d'éléments de comparaison pour apprécier la sécurité relative offerte par des navires de types analogues.

Ces principes ont été signalés par l'éminent constructeur anglais, M. Reed, en 1868 [1], à l'occasion de la mise en chantier des garde-côtes à franc-bord bas et à mâture (navires à tourelles du capitaine Coles); moins de deux ans après, les prévisions de M. Reed se réalisèrent malheureusement ; en août 1870, le *Captain* chavira dans un grain.

Dans les girations rapides des navires modernes, il se développe, comme on le verra plus loin, un couple transversal qui tend à coucher le navire en dehors de son cercle ; l'inclinaison d'équilibre correspondante à ce couple est assez faible, mais le navire peut dépasser cette inclinaison d'une quantité notable. Le garde-côtes cuirassé le *Tonnerre,* à 14 nœuds de vitesse avec toute la barre, prit une bande de 21° qui dura 60 secondes ; il finit par se redresser, mais la durée pendant laquelle il resta immobile montre que, sous cette inclinaison, le couple de redressement dépassait à peine le couple d'inclinaison; le danger du chavirement était assurément imminent.

Ce défaut a été corrigé depuis par l'addition, sur le pont, de deux rangées de caissons étanches, produisant le même effet qu'un exhaussement des œuvres mortes ; aujourd'hui, la bande maximum ne dépasse pas 8° et dure 29 secondes.

Variation de la stabilité dynamique résultant de l'addition d'un poids. — Sans nous étendre ici sur ce sujet, nous croyons utile de faire remarquer que l'addition d'un poids peut

1. *On the stability of monitors under canvass.* (*Transactions of the Institution of naval architects*, 1868.)

augmenter la stabilité initiale sans augmenter la sécurité du navire ; si en effet la courbe de stabilité différentielle (fig. 68) s'abaissait rapidement et passait sous l'axe des abscisses, elle diminuerait les ordonnées maxima de la courbe elle-même. Sur la plupart des navires ordinaires, cet effet n'est pas à redouter, mais on pourrait, avec les formes variées données actuellement aux navires de guerre, rencontrer des formes telles que l'addition de poids augmentât le stabilité initiale et diminuât la sécurité du navire ; il est donc prudent de ne pas perdre de vue cette particularité.

CHAPITRE V

CALCULS DE DÉPLACEMENT ET DE STABILITÉ POUR TOUTES LES INCLINAISONS [1].

---

§ 1er. — Objet des calculs, méthode de M. Reech.

Notations. — Soient (fig. 71) F_1L_1 une flottaison inclinée d'un angle θ, C_1 le centre de la carène correspondante, h_1 le point où la perpendiculaire C_1h_1 menée à la flottaison coupe l'axe OZ, et B le point où F_1L_1 coupe ce même axe.

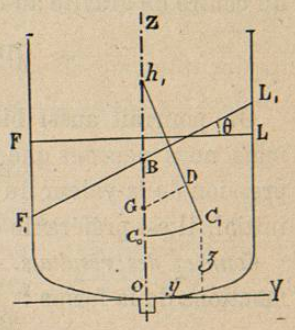

Fig. 71.

Nous désignerons respectivement par V, h, t, le volume de la carène, la hauteur du point h_1 au-dessus d'un point O qu'on peut considérer comme arbitraire et la hauteur de B au-dessus du même point. Dans les calculs qui suivent, nous supposerons que le point O est le dessous de la

1. On emploie quelquefois des méthodes expérimentales pour déterminer les éléments de la stabilité sous les grands angles ; le principe de ces méthodes est très simple : ayant déterminé par suspension la position du centre de gravité G d'un modèle du navire, on incline ce modèle flottant dans une cuve, à l'aide de moments connus, on obtient ainsi le moment de stabilité P.GD (fig. 71) ; par conséquent, on a la longueur du bras de levier GD, correspondant à la position du centre de gravité G ; il est facile d'en déduire la valeur correspondante à une autre position G'. On peut également employer des modèles en creux. Mais ces procédés ne peuvent pas être considérés comme suffisants ; la précision dépend trop de la fidélité avec laquelle le navire a été reproduit. Les calculs donnent des résultats plus certains ; quelque compliqués qu'ils paraissent, ils n'exigent pas plus de trois ou quatre journées de travail, et l'importance des résultats auxquels ils conduisent est assez grande pour justifier un pareil effort.